

W93P04867



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 199 58 262 A 1**

⑤1 Int. Cl. 7: **B9**  
**H 02 N 2/06**  
H 02 N 2/14  
F 02 M 51/06

②1 Aktenzeichen: 199 58 262.9  
②2 Anmeldetag: 3. 12. 1999  
④3 Offenlegungstag: 5. 7. 2001

DE 199 58 262 A 1

⑦1 Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦2 Erfinder:  
Chemisky, Eric, 85540 Haar, DE; Kappel, Andreas, Dr., 85649 Brunnthal, DE; Malki, Lhoussain, 80802 München, DE; Meixner, Hans. Prof. Dr., 85540 Haar, DE

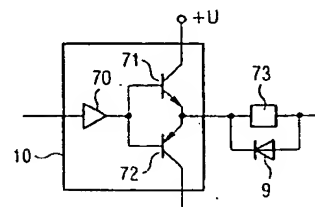
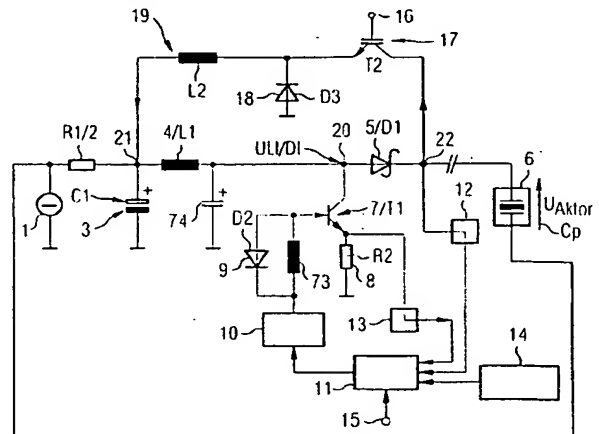
⑤6 Entgegenhaltungen:  
DE 40 35 132 C2  
DE 197 09 715 A1  
DE 196 53 666 A1  
Kasper: "Modulare Modellierung adaptiver mechanischer Systeme..." in DE-Z.: "Automatisierungstechnik" Bd.46 (1998), H.3, S.136-141;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zum Aufladen eines piezoelektrischen Aktors

⑤7 Das Aufladen eines piezoelektrischen Aktors wird in der Weise optimiert, daß die Aufladung gemäß einer Referenzkurve in mehreren Schritten durchgeführt wird, wobei nach jedem Schritt die am Aktor anliegende Spannung gemessen wird und mit der entsprechenden Spannung der Referenzkurve verglichen wird. Aus der Spannungsabweichung wird die dem Aktor zuzuführende Energie berechnet. Aus der berechneten Energie wird eine Aufladezeit bestimmt, mit der der Aktor auf die nächste Spannungsstufe aufgeladen wird. Diese Vorgehensweise verbessert die Auslenkungsdynamik des piezoelektrischen Aktors, der vorzugsweise in einem Einspritzventil eingesetzt wird.



DE 199 58 262 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Aufladen eines piezoelektrischen Aktors gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und eine Vorrichtung zum Aufladen eines piezoelektrischen Aktors gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 7.

Piezoelektrische Aktoren werden in den verschiedensten technischen Gebieten eingesetzt, um eine schnelle und präzise Steuerung eines Stellgliedes zu erreichen. Vorzugsweise dienen piezoelektrische Aktoren in der Kraftfahrzeugtechnik zum Steuern eines Einspritzventils, mit dem Kraftstoff in eine Brennkraftmaschine eingespritzt wird.

Es ist beispielsweise eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Aufladen eines piezoelektrischen Aktors eines Einspritzventils bekannt, bei dem der piezoelektrische Aktor mittels einer Umschwing-Endstufe, die im wesentlichen aus einem LC-Schwingkreis aufgebaut ist, aufgeladen wird. Der piezoelektrische Aktor wird dabei abhängig von seiner Kapazität gesteuert mit der im LC-Schwingkreis gespeicherten Energie aufgeladen. Die Kapazität des piezoelektrischen Aktors ist jedoch temperaturabhängig, so daß die Aufladung nicht immer optimal erfolgt.

Weiterhin werden nach dem bekannten Verfahren grundsätzlich Spannungen mit nicht einstellbaren, sinusförmigen Kurven erzeugt. Es hat sich gezeigt, daß diese Spannungskurven am Aktor hinsichtlich einer Geräuschabstrahlung nicht optimal sind, da die Impedanz des Aktors unter anderem in der Nähe der Frequenz der ansteuernden Sinuswelle eine Resonanz zeigt.

Die Aufgabe der Erfindung beruht darin, ein Verfahren bereitzustellen, das ein definiertes Aufladen des Aktors unabhängig von Änderungen der elektrischen Eigenschaften des Aktors ermöglicht.

Die Aufgabe der Erfindung wird mit den Merkmalen des Anspruchs 1 bzw. 7 gelöst.

Ein Vorteil der Erfindung besteht darin, daß der Aktor unabhängig von Temperatureinflüssen oder einer alterungsbedingten Änderung seiner Kapazität auf eine definierte Spannung aufgeladen wird.

Ein weiterer Vorteil der Erfindung ist, daß das Aufladen des Aktors mit verschiedenen Spannungsverläufen möglich ist. Dies bietet den Vorteil, daß ein optimierter Spannungsverlauf gewählt werden kann, der negative Auswirkungen, wie z. B. eine starke Geräuschabstrahlung, verhindert. Weiterhin kann durch einen optimierten Aufladevorgang die Bewegungskarakteristik des Aktors optimiert werden.

Weitere vorteilhafte Ausbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Es hat sich insbesondere bei Einspritzventilen gezeigt, mit denen der piezoelektrische Aktor über eine mechanische Übersetzungseinrichtung ein Stellglied ansteuert, daß es vorteilhaft ist, den Aktor nicht in einem einzigen Aufladevorgang, sondern in mehreren, mindestens zwei Aufladevorgängen auf die vorgegebene Spannung aufzuladen. Dies bietet den Vorteil, daß die Längenänderung des piezoelektrischen Aktors mit einer geringeren Dynamik erfolgt und somit die mechanische Übersetzung und das Stellglied einer geringeren mechanischen Belastung ausgesetzt sind.

Vorteilhaft ist es, eine Referenzkurve für den Aufladevorgang des Aktors abzulegen und anhand dieser den Aufladevorgang zu regeln. Diese Vorgehensweise bietet ein einfaches und genaues Regelungsverfahren zum Aufladen des piezoelektrischen Aktors.

Eine weitere Optimierung der Dynamik des sich auslenkenden piezoelektrischen Aktors wird dadurch erreicht, daß die Spannungserhöhung während des Aufladens des piezoelektrischen Aktors in mehreren Stufen erfolgt, wobei mit der Anzahl der Stufen die jeweilige Spannungserhöhung reduziert wird.

Besonders vorteilhaft ist es, den Aufladevorgang des piezoelektrischen Aktors in Abhängigkeit von der Energie zu steuern, die für die jeweilige Erhöhung der Spannung dem piezoelektrischen Aktor zugeführt werden muß. Dies bietet den Vorteil, daß neben der Spannung auch die Kapazität des piezoelektrischen Aktors berücksichtigt wird.

Ein relativ einfaches Verfahren zum Aufladen des piezoelektrischen Aktors wird dadurch erreicht, daß der Aufladevorgang über die Ladezeit des Aktors gesteuert wird. Die Ladezeit bietet den Vorteil, daß sie mit Hilfe eines schnellen Schalters präzise vorgegeben werden kann.

Besonders vorteilhaft ist es, bei der Verwendung einer Induktivität zum Aufladen des piezoelektrischen Aktors, die Induktivität außerhalb der Sättigung zu betreiben, um eine Veränderung der elektrischen Parameter der Schaltungsanordnung zu vermeiden. In einfacher Weise wird dies dadurch erreicht, daß die Induktivität nach einem Ladevorgang erst dann wieder bestromt wird, wenn der Strom durch die Induktivität auf einen Wert um 0 Ampere gesunken ist und der Ladestrom unterhalb einer vorgegebenen Sättigungsgrenze liegt.

Weiterhin ist es vorteilhaft, einen elektrischen Anschluß des piezoelektrischen Aktors mit der Aufladeschaltung zu verbinden und den zweiten elektrischen Anschluß des piezoelektrischen Aktors auf die gleiche Spannungshöhe zu legen, mit der auch die Aufladeschaltung mit Strom versorgt wird.

Die Erfindung wird im folgenden anhand der Figuren näher erläutert:

Es zeigen:

Fig. 1 eine Schaltungsanordnung zum Aufladen eines piezoelektrischen Aktors,

Fig. 2 einen Verfahrensablauf zum Aufladen des piezoelektrischen Aktors,

Fig. 3 ein Meßdiagramm über einen Spannungs- und Stromverlauf während eines Aufladevorgangs, und

Fig. 4 ein Einspritzventil mit einem piezoelektrischen Aktor.

Fig. 1 zeigt eine Spannungsquelle 1, die über einen ersten Widerstand 2 an einen ersten Knotenpunkt 21 angeschlossen ist. An den ersten Knotenpunkt 21 ist ein Kondensator 3 angeschlossen, dessen zweiter Anschluß mit Masse verbunden ist. Der erste Knotenpunkt 21 ist über eine Spule 4 mit einem zweiten Knotenpunkt 20 verbunden. An den zweiten Knotenpunkt ist vorzugsweise ein zweiter Kondensator 74 angeschlossen, der mit seinem zweiten Anschluß mit Masse verbunden ist. Der zweite Kondensator 74 dient zur Begrenzung der Stromspitzen, ist vorzugsweise als Folienkondensator ausgebildet und weist einen geringen Übergangswiderstand auf. Der zweite Knotenpunkt 20 ist über eine Diode 5 an einen dritten Knotenpunkt 22 angeschlossen. An den dritten Knotenpunkt 22 ist ein erster Anschluß des piezoelektrischen Aktors 6 geführt. Der zweite Anschluß des piezoelektrischen Aktors 6 steht mit der Spannungsquelle 1 in Verbindung. Der piezoelektrische Aktor stellt in Bezug auf seine elektrischen Eigenschaften eine Kapazität dar. Die Auslenkung des piezoelektrischen Aktors ist nahezu direkt proportional zur angelegten Spannung. Zudem beeinflußt auch die Art und

Weise der Spannungserhöhung die Dynamik der Auslenkung des Aktors. Deshalb ist es besonders vorteilhaft, den Aufladevorgang des Aktors nach einer vorgegebenen Referenzkurve zu regeln. Die Referenzkurve wurde in vorhergehenden Versuchen optimiert.

An dem dritten Knotenpunkt 22 ist eine Spannungsmßeinrichtung 12 angeschlossen, deren Ausgang zu einer Steuereinheit 11 geführt ist. Die Steuereinheit 11 ist zudem an einen Datenspeicher 14 angeschlossen. Weiterhin ist die Steuereinheit 11 an eine Strommeßeinrichtung 13 angeschlossen. Die Steuereinheit 11 verfügt über einen ersten Steueranschluß 15, der mit einem nicht dargestellten Steuergerät in Verbindung steht. Der Ausgang der Steuereinheit 11 führt zu einer Verstärkerstufe 10, deren Ausgang mit einem Steueranschluß, d. h. mit dem Basis-Anschluß eines Transistors 7 verbunden ist. Der Transistor 7 ist vorzugsweise als IGBT-Typ ausgebildet. Der Kollektoranschluß des Transistors 7 ist an den zweiten Knotenpunkt 20 angeschlossen. Der Emitter-Anschluß des Transistors 7 ist über einen zweiten Widerstand 8 an Masse angeschlossen. Weiterhin ist der Eingang der Strommeßeinrichtung 13 an den Emitter-Anschluß des Transistors 7 angeschlossen.

Der Steueranschluß des ersten Transistors 7 ist über eine Parallelschaltung eines dritten Widerstandes 73 mit einer zweiten Diode 9 mit der Verstärkerstufe 10 verbunden. Die Verwendung der zweiten Diode 9 erlaubt es, den ersten Transistor 7 schnell auszuschalten.

Die Verstärkerstufe 10 ist in der Weise ausgelegt, daß die Ausschaltzeit des ersten Transistors 7 minimiert ist und vorzugsweise kleiner als 1  $\mu$ s ist. Vorzugsweise wird eine Push-Pull-Endstufe verwendet, wie in Fig. 1a dargestellt ist.

Die Push-Pull-Endstufe besteht aus einem Operationsverstärker 70 und einer Parallelschaltung aus einem dritten und vierten Transistor 71, 72. Der dritte Transistor 71 ist ein npn-Transistor und der vierte Transistor 72 ist ein pnp-Transistor. Der Steueranschluß des dritten und vierten Transistors 71, 72 sind mit dem Ausgang des Operationsverstärkers 70 verbunden. Die Emitteranschlüsse des dritten und des vierten Transistors sind mit der Parallelschaltung des dritten Widerstandes 73 und der zweiten Diode 9 verbunden. Der Kollektoranschluß des vierten Transistors 72 ist an Masse angeschlossen und der Kollektoranschluß des dritten Transistors 71 steht mit einer Versorgungsspannung, vorzugsweise mit dem Pluspol der Spannungsquelle 1 in Verbindung.

Zum Entladen der Kapazität  $C_p$  des piezoelektrischen Aktors 6 ist zwischen dem dritten und dem ersten Knotenpunkt 22, 21 ein Entladezweig angeschlossen. Den Entladezweig bilden ein zweiter Transistor 17, dessen Kollektoranschluß mit dem dritten Knotenpunkt 23 verbunden ist. Der Steueranschluß 16, d. h. der Basis-Anschluß des zweiten Transistors 17 ist an das nicht dargestellte Steuergerät angeschlossen. Der Emitter-Anschluß des zweiten Transistors 17 steht über eine zweite Spule 19 mit dem ersten Knotenpunkt 21 in Verbindung. Zwischen dem zweiten Transistor 17 und der zweiten Spule 19 ist eine dritte Diode 18 angeschlossen, die in Richtung auf Masse sperrt.

Der erste Transistor 7 und der zweite Transistor 17 stellen einen ersten und einen zweiten Schalter dar, die abhängig von der Ansteuerung einen Stromfluß über den ersten bzw. den zweiten Transistor 7, 17 ermöglichen. Wird der Steueranschluß 15, 16 des ersten oder zweiten Transistors 7, 17 nicht angesteuert, so ist der erste bzw. der zweite Schalter nicht leitend und es fließt kein Strom über den ersten oder den zweiten Transistor 7, 17. Weiterhin ist es vorteilhaft, die erste Diode 5 als schnelle Schaltdiode, vorzugsweise mit einer Schaltzeit kleiner als 50 ns und mit einer hohen Sperrspannung auszubilden.

Die Funktionsweise der Schaltungsanordnung nach Fig. 1 wird im folgenden anhand des Programmablaufs nach Fig. 2 näher erläutert: Bei Programmpunkt 30 gibt das Steuergerät den Befehl zum Laden des piezoelektrischen Aktors 6. Dazu wird ein entsprechendes Signal bei Programmpunkt 31 an den ersten Steueranschluß 15 der Steuereinheit 11 mit einem High-Pegel und ein entsprechendes Signal bei Programmpunkt 32 an den Steueranschluß 16 des zweiten Transistors 17 gegeben, das einen Low-Pegel aufweist. Entsprechend der Ansteuerung ist der zweite Transistor 17 auf Sperren geschaltet. Die Steuereinheit 11 hingegen bekommt durch diese Ansteuerung das Signal, daß der piezoelektrische Aktor 6 aufgeladen werden soll.

Die Steuereinheit 11 überprüft dazu bei Programmpunkt 33, ob seit dem letzten Aufladen des piezoelektrischen Aktors eine gewisse Mindestzeit vergangen ist, damit der Kondensator 3 durch die Spannungsquelle 1 wieder aufgeladen ist. Die Mindestzeit beträgt bei einer Bordspannung von typischerweise 12 Volt ungefähr 5 ms. Innerhalb dieser Mindestzeit wird der Kondensator 3 vom ersten Widerstand 2 langsam aufgeladen. Der Kondensator 3 dient als Zwischenspannungsquelle mit niedriger Ausgangsimpedanz. Somit erlaubt der Kondensator 3 sehr hohe Impulsströme, mit denen die Spule 4 durchflossen wird, so daß in der Spule 4 möglichst viel magnetische Energie gespeichert wird. Ist seit dem letzten Aufladen die Mindestzeit vergangen, so überprüft die Steuereinheit 11 bei Programmpunkt 34, ob der Strom durch die Spule 4 auf einen vorgegebenen Wert gefallen ist. Vorzugsweise sollte der Wert bei 0 A liegen. Diese Überprüfung dient dazu, daß gewährleistet ist, daß die Spule 4 außerhalb der Sättigung betrieben wird, und somit eine Zerstörung oder Überlastung der Spule 4 und des ersten Transistors 7 vermieden wird. Ist der Wert des Stromes durch die Spule 4 unter dem vorgegebenen Wert, d. h. unter dem Sättigungswert, so wird nach Programmpunkt 35 verzweigt. Der Programmpunkt 34 ist zur Ausbildung der Schaltungsanordnung nicht unbedingt notwendig und ist deshalb nur optional vorgesehen.

Bei Programmpunkt 35 bestimmt die Steuereinheit 11 die Ladezeit  $t_{ON}$  für den ersten Transistor 7. Dazu erfaßt die Steuereinheit 11 bei Programmpunkt 36 über die Spannungsmßeinrichtung 12 die derzeit am piezoelektrischen Aktor 6 anliegende Spannung. Die anliegende Spannung wird mit der Spannung der Referenzkurve verglichen, die aus dem Datenspeicher 14 geholt wird. Dabei ist die Referenzspannung die Spannung, die am piezoelektrischen Aktor 6 nach dem Aufladevorgang anliegen soll. In dem vorliegenden Beispiel ist der piezoelektrische Aktor 6 in seiner Ausgangsposition und damit liegt eine Spannungsdifferenz von 0 V zwischen den zwei Anschlüssen des piezoelektrischen Aktors 6 an. Die Referenzspannung beträgt für den ersten Aufladevorgang in diesem Beispiel 80 V. Somit muß bei diesem Aufladevorgang eine Spannungserhöhung am piezoelektrischen Aktor 6 von 80 V erreicht werden. Vorzugsweise wird die für die Spannungserhöhung benötigte Energie durch eine Berechnung bestimmt. Die Energie am piezoelektrischen Aktor zum Zeitpunkt  $t = n$  wird nach folgender Formel bestimmt:

Formel (1) 
$$E_a(n) = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot U_n^2 \quad (1)$$

5 wobei  $E_a$  die Energie im Aktor,  $C_p$  die Großsignalkapazität des Aktors und  $U_n$  die Aktorspannung bezeichnet. Die Energie, die durch den Aufladevorgang auf den Aktor übertragen wird, wird nach folgender Formel berechnet:

Formel (2) 
$$E_t(n) = \frac{1}{2} \eta \cdot L \cdot i_{\max}^2 \quad (2)$$

10 wobei mit  $E_t$  die Energie bezeichnet ist, die durch den Aufladevorgang zum Zeitpunkt  $n$  übertragen wird,  $\eta$  den Wirkungsgrad des Systems darstellt,  $L$  die Induktivität der Spule 4 und  $i_{\max}$  den maximalen Ladestrom bezeichnet. Der maximale Ladestrom  $i_{\max}$  wird nach folgender Formel berechnet:

15 Formel (3) 
$$i_{\max} = \frac{(U \cdot t_{ON})}{L} \quad (3)$$

wobei mit  $U$  die Spannung der Spannungsquelle 1, die vorzugsweise die Bordspannung eines Kraftfahrzeuges ist und vorzugsweise 42 Volt beträgt, und mit  $t_{ON}$  die Ladezeit bezeichnet ist, die der erste Transistor 7 geschlossen ist. Typischerweise beträgt die Spannung der Spannungsquelle 1 12 V, die Induktivität  $L$  14  $\mu$ H und der Wirkungsgrad  $\eta$  ungefähr 80%.

Die Energie, die sich zum Zeitpunkt  $n + 1$  im Aktor befindet, wird nach folgender Formel bestimmt:

25 Formel (4) 
$$E_a(n + 1) = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot U_{n+1}^2 \quad (4)$$

Zudem gilt die Beziehung:

Formel (5) 
$$E_a(n) + E_t(n) = E_a(n + 1) \quad (5)$$

30 Die Formeln (1) bis (5) ergeben:

$$t_{ON} = \sqrt{\frac{C_p \cdot L \cdot (U_{n+1} - U_n)}{U^2 \cdot \eta}} = 10 \mu s \cdot \frac{\sqrt{U_{n+1} - U_n}}{U} \quad (6)$$

35 Auf diese Weise berechnet die Steuereinheit 11 die Ladezeit  $t_{ON}$  für den Aufladevorgang, während der der erste Transistor 7 leitend ist.

Anschließend gibt die Steuereinheit 11 bei Programmpunkt 37 während der für diesen Aufladevorgang berechneten Aufladezeit ein Steuersignal an die Verstärkerstufe 10, die wiederum entsprechend der vorgegebenen Aufladezeit den ersten Transistor 7 aufsteuert. Als Folge davon fließt vorwiegend vom dritten Kondensator 3 über die Spule 4 ein Strom durch den ersten Transistor 7, der über den zweiten Widerstand 8 nach Masse geführt wird. Durch die Anordnung des zweiten Kondensators 74 werden große Stromspitzen im Ladestrom geglättet.

45 Die Erfindung wird am Beispiel einer Schaltungsanordnung für ein Einspritzventil beschrieben. Jedoch ist die Erfindung nicht auf die Anwendung in der Kraftfahrzeugtechnik bei Einspritzventilen begrenzt, sondern kann in jedem Bereich der Technik zur Aufladung eines piezoelektrischen Aktors verwendet werden. Der Fachmann wird zudem die Dimensionierung der Bauelemente entsprechend den erforderlichen Gegebenheiten anpassen.

Fig. 3 zeigt den Spannungs- und Stromverlauf der Schaltung während eines Aufladevorgangs. Dabei ist mit  $t_{ON}$  die Zeit bezeichnet, während der der erste Transistor 7 geschlossen ist. Mit  $t_{OFF}$  ist die Zeit bezeichnet, während der der erste Transistor 7 geöffnet ist. Der Strom durch die Spule 4 ist mit  $I_L$  bezeichnet und in Ampere angegeben. Über dem Stromfluß der Spule 4 ist die Aktorspannung, d. h. der Spannungsabfall über die Kapazität des piezoelektrischen Aktors aufgetragen und mit Aktorspannung bezeichnet, die einen Wert von 0 V bis 160 V einnimmt. Der Wert von 160 V entspricht der maximalen Aktorspannung, bei der der Aktor auf seine maximal vorgegebene Länge sich ausgedehnt hat.

50 Aus Fig. 3 ist erkennbar, daß zum Zeitpunkt  $t_1$  der erste Transistor 7 geöffnet wird und folglich der Strom durch die Spule 4 linear ansteigt. Es ist erkennbar, daß während der erste Transistor 7 geöffnet ist, sich die Spannung am piezoelektrischen Aktor 6 nicht erhöht. Zum Zeitpunkt  $t_2$  schaltet die Steuereinheit 11 bei Programmpunkt 39 über die Verstärkerstufe 10 den ersten Transistor 7 ab. Die Zeitdifferenz zwischen  $t_2$  und  $t_1$  entspricht der zuvor berechneten Einschaltzeit  $t_{ON}$ :  $t_2 - t_1 = t_{ON}$ . Das abrupte Abschalten des ersten Transistors 7, wobei der Abschaltvorgang vorzugsweise kürzer als 1  $\mu$ s dauert, induziert eine Spannung am zweiten Knotenpunkt 20, die nach folgender Formel berechnet wird:

60 
$$U_L = L_1 \cdot di_L/dt$$

wobei mit  $L_1$  die Induktivität der Spule 4 und mit  $di_L/dt$  die zeitliche Änderung des Stroms durch die Induktivität bezeichnet ist, die durch den abrupten Abschaltvorgang sehr groß ist. Die in der Induktivität der Spule 4 gespeicherte magnetische Energie wird auf diese Weise in eine hohe Spannung umgewandelt, so daß ein Strom über die erste, leitend gewordene Diode 5 zur Kapazität  $C_p$  des piezoelektrischen Aktors 6 fließt. Fällt die Spannung nach dem Öffnen des ersten Transistors 7 am dritten Knotenpunkt 22 unter die aktuelle Aktorspannung, so sperrt die erste Diode 5. Die während des Aufladevorgangs auf den piezoelektrischen Aktor 6 übertragene Energie müßte der Energie entsprechen, die zuvor von der Steuereinheit 11 für diesen Aufladevorgang berechnet wurde.

Anschließend mißt die Steuereinheit 11 bei Programmpunkt 40 über die Spannungsmeßeinrichtung 12 die am piezoelektrischen Aktor 6 anliegende Spannung. Die Steuereinheit 11 vergleicht die gemessene Spannung bei Programmpunkt 41 mit der Spannung, die durch den Aufladevorgang erreicht werden sollte. Liegt eine Abweichung vor, so wird der Koeffizient für den Wirkungsgrad  $\eta$  entsprechend erhöht oder erniedrigt. Auf diese Weise wird gewährleistet, daß auch Änderungen im Wirkungsgrad des Systems berücksichtigt werden.

Anschließend überprüft die Steuereinheit bei Programmpunkt 42, ob die maximale Spannung für den piezoelektrischen Aktor erreicht wurde.

Wurde die maximale Spannung erreicht, so wird nach Programmpunkt 50 verzweigt. Wurde die maximale Spannung nicht erreicht, so wird nach Programmpunkt 33 zurückverzweigt. In unserem Ausführungsbeispiel werden die Programmpunkte 33 bis 37 wieder durchlaufen und anschließend zum Zeitpunkt t3 der erste Transistor 7 entsprechend Programmpunkt 38 wieder geschlossen. Entsprechend der zuvor berechneten Einschaltzeit  $t_{ON}$  wird der erste Transistor 7 zum Zeitpunkt t4 wieder geöffnet, so daß wieder die in der Spule 4 gespeicherte magnetische Energie in eine entsprechend hohe Spannung am zweiten Knotenpunkt 20 umgewandelt wird und damit wieder eine Spannungserhöhung am piezoelektrischen Aktor 6 erreicht wird.

Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis die maximale Spannung, in diesem Fall eine Spannungsdifferenz von 160 V, über dem piezoelektrischen Aktor 6 abfällt.

Dies wird bei Programmpunkt 42 wieder überprüft und bei vorliegender maximaler Spannung nach Programmpunkt 50 verzweigt.

Bei Programmpunkt 50 überprüft das Steuergerät, ob das Einspritzventil ausreichend lang für eine Kraftstoffeinspritzung geöffnet war, d. h., ob über eine ausreichend lange Zeit die maximale Spannung am piezoelektrischen Aktor 6 anlag. Ist dies der Fall, so wird anschließend bei Programmpunkt 51 vom Steuergerät ein Low-Signal an die Steuereinheit 11 gegeben. Das Low-Signal zeigt der Steuereinheit 11 an, daß ein Entladevorgang des piezoelektrischen Aktors 6 gestartet wird. Während des Entladevorgangs steuert die Steuereinheit 11 die Verstärkerstufe 10 nicht an, so daß der erste Transistor 7 abgeschaltet bleibt. Gleichzeitig gibt das Steuergerät bei Programmpunkt 52 ein Steuersignal an den Steueranschluß 16 des zweiten Transistors 17, so daß der zweite Transistor 17 öffnet und ein Stromfluß vom dritten Knotenpunkt 22 zum ersten Knotenpunkt 21 erfolgt. Auf diese Weise wird der piezoelektrische Aktor 6 und damit die Kapazität  $C_p$  des piezoelektrischen Aktors 6 entladen. Der Entladevorgang wird im einfachsten Fall mit einem einzigen Entladevorgang erreicht, so daß die Spannung am piezoelektrischen Aktor 6 von der maximalen Spannung auf 12 V absinkt. In einer bevorzugten Ausführungsform wird die Entladung des piezoelektrischen Aktors 6 auch in mehreren Stufen durchgeführt, um auf diese Art und Weise auch die Dynamik der Kontraktion des piezoelektrischen Aktors 6 definiert zu steuern.

Für den Entladevorgang ist eine Entladezeit abgespeichert, während der das Steuergerät den zweiten Transistor 17 geöffnet hält, so daß eine vollständige Entladung des piezoelektrischen Aktors 6 gewährleistet ist.

Nach dem Entladen des piezoelektrischen Aktors 6 schaltet das Steuergerät das Signal an den Steueranschluß 16 wieder auf ein Low-Signal, so daß der zweite Transistor 17 geöffnet ist und über den zweiten Transistor 17 vom dritten Knotenpunkt 22 zum ersten Knotenpunkt 21 kein Strom fließt.

Nach dem Entladen wird nach Programmpunkt 30 verzweigt und das Steuergerät wartet darauf, bis wieder eine Einspritzung durchgeführt werden soll und steuert dann entsprechend Programmpunkt 30 wieder die Steuereinheit 11 an.

In einer einfachen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird auf die Spannungsmeßeinrichtung 12 verzichtet, so daß die Spannungserhöhung am piezoelektrischen Aktor nur nach einer vorgegebenen Referenzkurve gesteuert wird. Dabei wird jedoch vorzugsweise darauf geachtet, daß der Strom durch die Spule 4 jeweils auf 0 A absinkt, bevor ein neuer Aufladevorgang gesteuert wird. Dies wird vorzugsweise durch die Strommeßeinrichtung 13 gewährleistet, die am Emitteranschluß des ersten Transistors 7 ein Spannungssignal abgreift, das dem Strom durch die Spule 4 proportional ist.

Der erste und der zweite Transistor 7, 17 sind vorzugsweise als IGBT-Transistoren ausgebildet. Der erste und der zweite Transistor 7, 17 stellen schnelle Schalter dar. Ein Fachmann kann anstelle der in dem Ausführungsbeispiel verwendeten Transistoren jeden beliebigen Schalter verwenden, der schnell geschaltet werden kann. Dies ist insbesondere für den ersten Transistor 7 von Bedeutung, da die Höhe der am dritten Knotenpunkt 22 auftretenden Spannung proportional zur zeitlichen Änderung des Stroms durch die Spule 4 ist und damit von der Ausschaltzeit des ersten Transistors 7 abhängt.

Für die Einschaltzeit ist dies beim ersten Transistor 7 weniger von Bedeutung, da der Strom durch die Spule 4 mit der Induktivität L1 und über den zweiten Widerstand R2 relativ langsam und linear ansteigt. Die Einschaltzeit sollte jedoch relativ klein bemessen werden, um Verluste am ersten Transistor 7, die z. B. durch Erwärmen erzeugt werden, klein bleiben.

Ein Vorteil der Schaltungsanordnung nach Fig. 1 beruht darin, daß der zweite Anschluß des piezoelektrischen Aktors 6 auf dem positiven Potential ruht. Hierdurch ist es möglich, daß am piezoelektrischen Aktor 6 ein Spannungsabfall im Bereich von 0 bis 160 V erzeugt werden kann. Dies ist jedoch nur möglich, indem die Schaltungsanordnung in der Weise ausgelegt ist, daß am dritten Knotenpunkt 22 eine Spannung von +172 V erzeugt werden kann.

Die Aufladezeiten hängen von der momentanen Abweichung der gemessenen Aktorspannung zu der gewünschten Aktorspannung ab, die der Referenzkurve entnommen ist. Ist die aktuelle Aktorspannung zu klein, muß dem Aktor eine größere Energie zugeführt werden. Dazu muß der Induktivitätsstrom durch die Spule 4 steigen, so daß eine längere Aufladezeit erforderlich ist. Vorzugsweise erfolgt die Aufladung des piezoelektrischen Aktors in kleinen elementaren Ladevorgängen, die nahezu gleich lang sind. Für eine Aufladezeit von 100  $\mu$ s, während der der piezoelektrische Aktor auf seine maximale Spannung aufgeladen wird, sind vorzugsweise 20 Aufladevorgänge vorgesehen. Bei jedem Aufladevorgang erfolgt der Regelprozeß für die Berechnung der nächsten Aufladezeit entsprechend dem Programm der Fig. 2.

Bevorzugte Werte für die Bauelemente der Schaltungsanordnung nach Fig. 1 sind: R1 = 0,5  $\Omega$ , R2 = 0,05  $\Omega$ , C1 = 660  $\mu$ F bei 25 V, Cp = 6  $\mu$ F, t1 = BUP 304, L1 = 14  $\mu$ H. Für den ersten und zweiten Transistor T1 und T2 = BUP 304 oder IGR40P30FD, D1 = BYR 29/800 ( $\pm 40\%$ ).

Fig. 4 zeigt ein Einspritzventil 60 mit einem piezoelektrischen Aktor 61, der über ein Stellglied 67 mit einer Einspritznadel 63 verbunden ist. In der Ruheposition liegt die Einspritznadel 63 auf einem Dichtsitz 64 auf und dichtet einen Kraftstoffkanal 65 ab. Der Kraftstoffkanal 65 steht über eine Zuleitung 66 mit einem Kraftstoffspeicher in Verbindung. Soll eine Einspritzung erfolgen, so gibt das Steuergerät ein Ansteuersignal an elektrische Leitungen 62 des piezoelektrischen Aktors 61. Der piezoelektrische Aktor 61 dehnt sich in Folge der Ansteuersignale aus, und schiebt damit die Einspritznadel 63 nach unten vom Dichtsitz 64 ab. Somit wird ein ringförmiger Einspritzkanal geöffnet, über den Kraftstoff aus dem Kraftstoffkanal 65 in einen zugeordneten Brennraum einer Brennkraftmaschine entweichen kann.

Soll die Einspritzung nach einer vorgegebenen Einspritzzeit gestoppt werden, so schaltet das Steuergerät die Ansteuersignale ab. Als Folge davon zieht sich der piezoelektrische Aktor 61 wieder zusammen und bewegt die Einspritznadel 63 nach oben, die dichtend am Ventilsitz 64 in Anlage gebracht wird.

Das Programm zur Steuerung der Einspritzung ist in einem Datenspeicher abgelegt, der mit dem Steuergerät in Verbindung steht.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Aufladen eines piezoelektrischen Aktors mit einer Spannungsquelle, **dadurch gekennzeichnet**, daß die am Aktor (6) anliegende Spannung gemessen wird, und daß das Aufladen des Aktors (6) auf eine vorgegebene Spannung in Abhängigkeit von der gemessenen Spannung geregelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Aktor (6) in mindestens zwei Aufladestufen auf die vorgegebene Spannung aufgeladen wird.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß eine vorgegebene Referenzkurve für den Aufladevorgang des Aktors (6) verwendet wird, daß die gemessene Spannung mit der Referenzkurve verglichen wird, daß aus dem Vergleich eine Spannungserhöhung ermittelt wird, und daß nach der ermittelten Spannungserhöhung das Aufladen des Aktors (6) gesteuert wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß bei zwei nacheinander ausgeführten Aufladevorgängen beim ersten Aufladevorgang die Spannungserhöhung größer ist als die Spannungserhöhung, die beim folgenden Aufladevorgang erreicht wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß aus der gemessenen Spannung und der vorgegebenen Spannung die Energie berechnet wird, die dem Aktor (6) zugeführt werden muß, um die Spannung am Aktor (6) auf die gemessene Spannung zu erhöhen, und daß dem Aktor (6) die berechnete Energie zugeführt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß aus der berechneten Energie die Ladezeit ( $t_1$  on) des Aktors (6) berechnet wird, daß der Aktor (6) entsprechend der Ladezeit ( $t_1$  on) mit einem vorgegebenen Strom versorgt wird, daß für die Berechnung der Ladezeit ein Wirkungsgrad berücksichtigt wird, daß der Wirkungsgrad überprüft wird, wobei die bei einem Aufladevorgang zu erreichende Spannung mit der tatsächlich nach dem Aufladevorgang am Aktor anliegenden Spannung verglichen wird, und daß bei einer Abweichung der Wirkungsgrad für die Berechnung der nächsten Ladezeit korrigiert wird.
7. Vorrichtung zum Aufladen eines piezoelektrischen Aktors mit einer Spannungsquelle (1), die an eine Serienschaltung aus einer Induktivität (4), einer Diode (5) und einem Aktor (6) angeschlossen ist, mit einem Schalter (7), der zwischen der Induktivität (4) und der Diode (5) an die Serienschaltung angeschlossen ist, und über den die Serienschaltung mit Masse verbindbar ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein Spannungsmesser (12) vorgesehen ist, der mit dem Aktor (6) verbunden ist, daß eine Steuereinheit (11) vorgesehen ist, die mit dem Spannungsmesser (12) verbunden ist, daß die Steuereinheit (11) an den Schalter (7) angeschlossen ist, daß die Steuereinheit (11) in Abhängigkeit von der am Aktor (6) anliegenden Spannung und einer vorgegebenen Spannung eine Schließzeit ( $t_1$  on) für den Schalter (7) ermittelt, und daß die Steuereinheit (11, 10) den Schalter (7) während der ermittelten Schließzeit ( $t_1$  on) schließt und anschließend wieder öffnet.
8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß eine Strommesseinrichtung (13) vorgesehen ist, die an den Stromfluß angeschlossen ist, der durch die Induktivität (4) fließt, daß die Strommesseinrichtung (13) mit der Steuereinheit (11) verbunden ist, und daß die Steuereinheit (11) den Schalter erst wieder schließt, wenn der Strom durch die Induktivität unter einen vorgegebenen Wert gesunken ist.
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Spannungsquelle (1) eine Gleichspannungsquelle darstellt, die über einen Widerstand (2) an die Induktivität (4) angeschlossen ist, und daß zwischen dem Widerstand (2) und der Induktivität (4) ein Kondensator (3) geschaltet ist, der mit Masse verbunden ist.
10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Anschluß des Aktors (6) an den positiven Pol der Gleichspannungsquelle (1) angeschlossen ist.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

FIG 1A

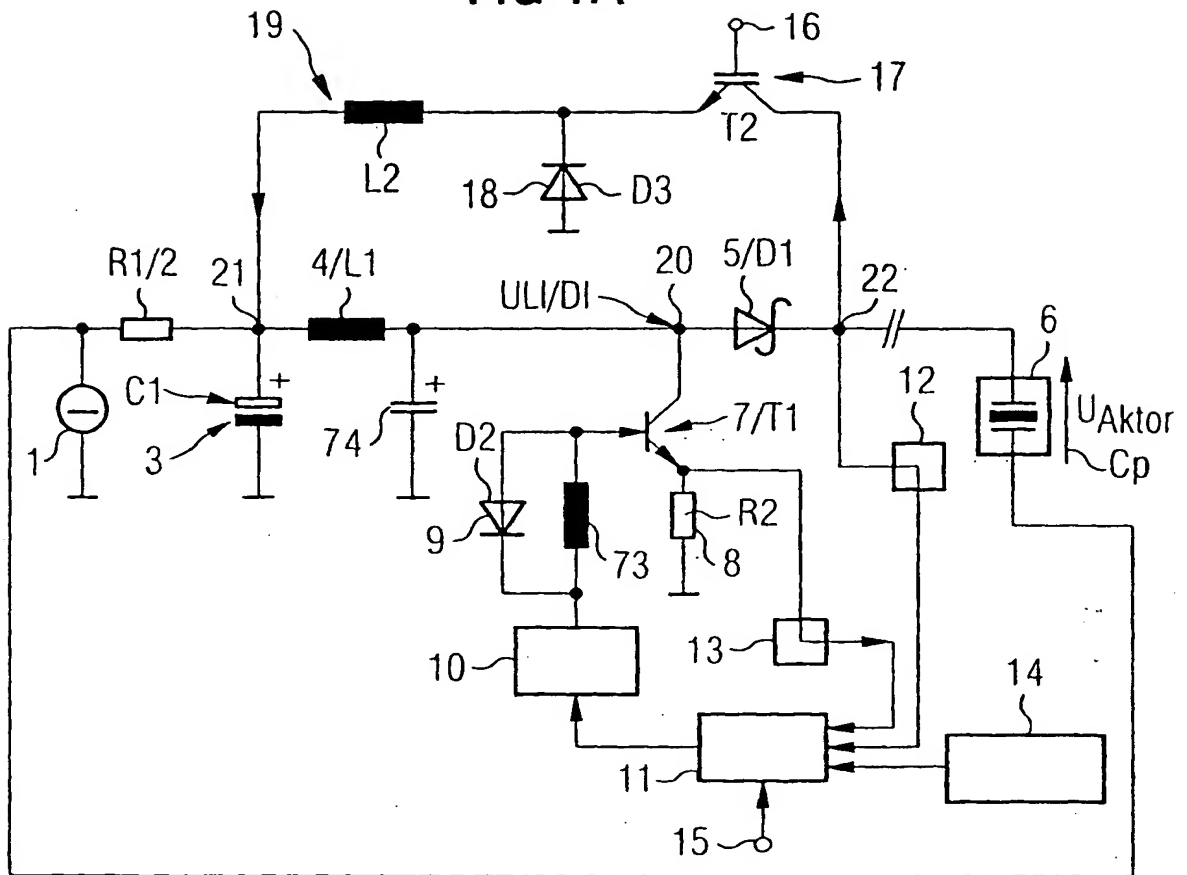


FIG 1B

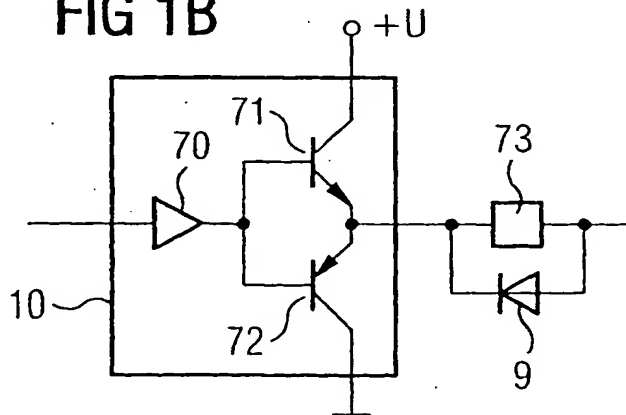


FIG 2

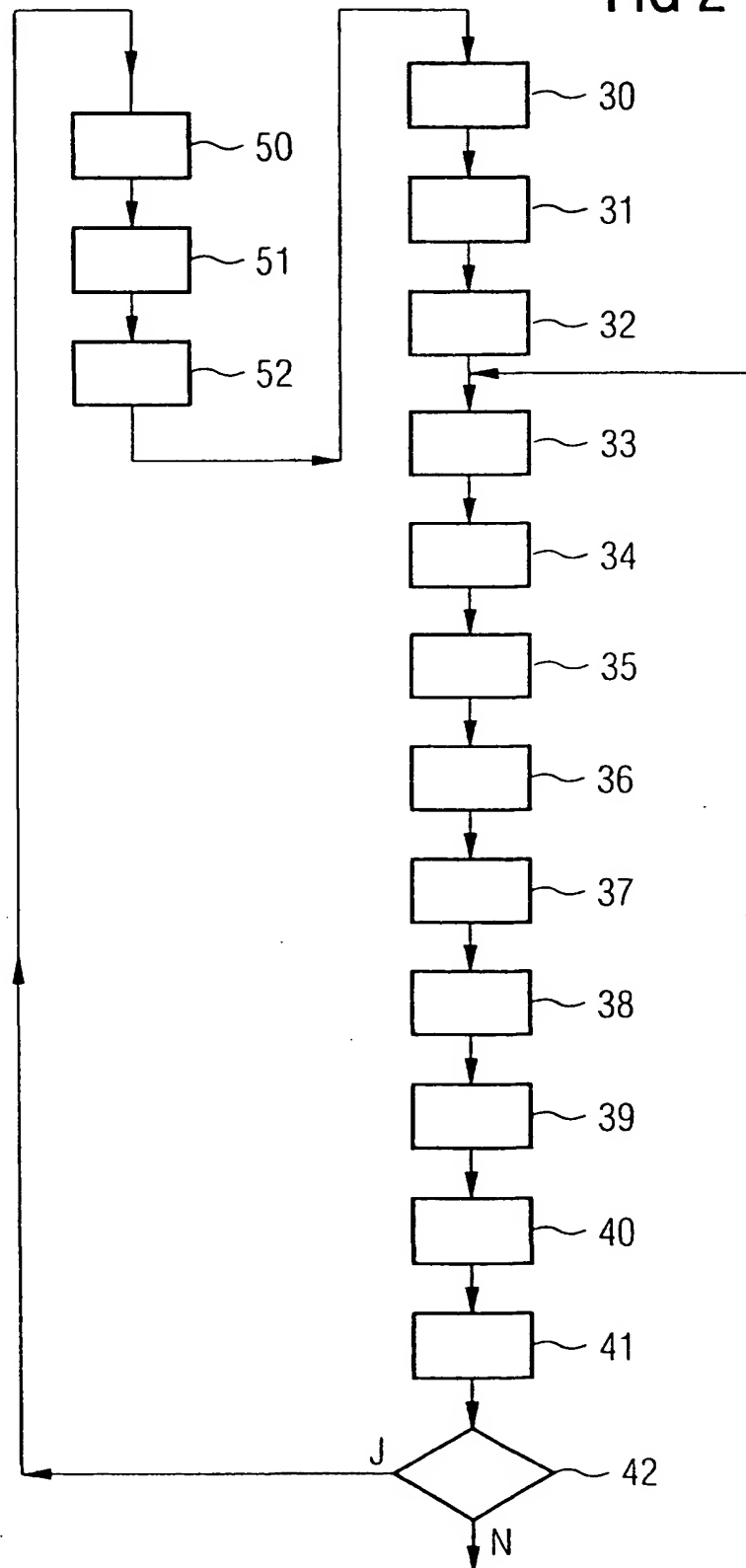




FIG 3

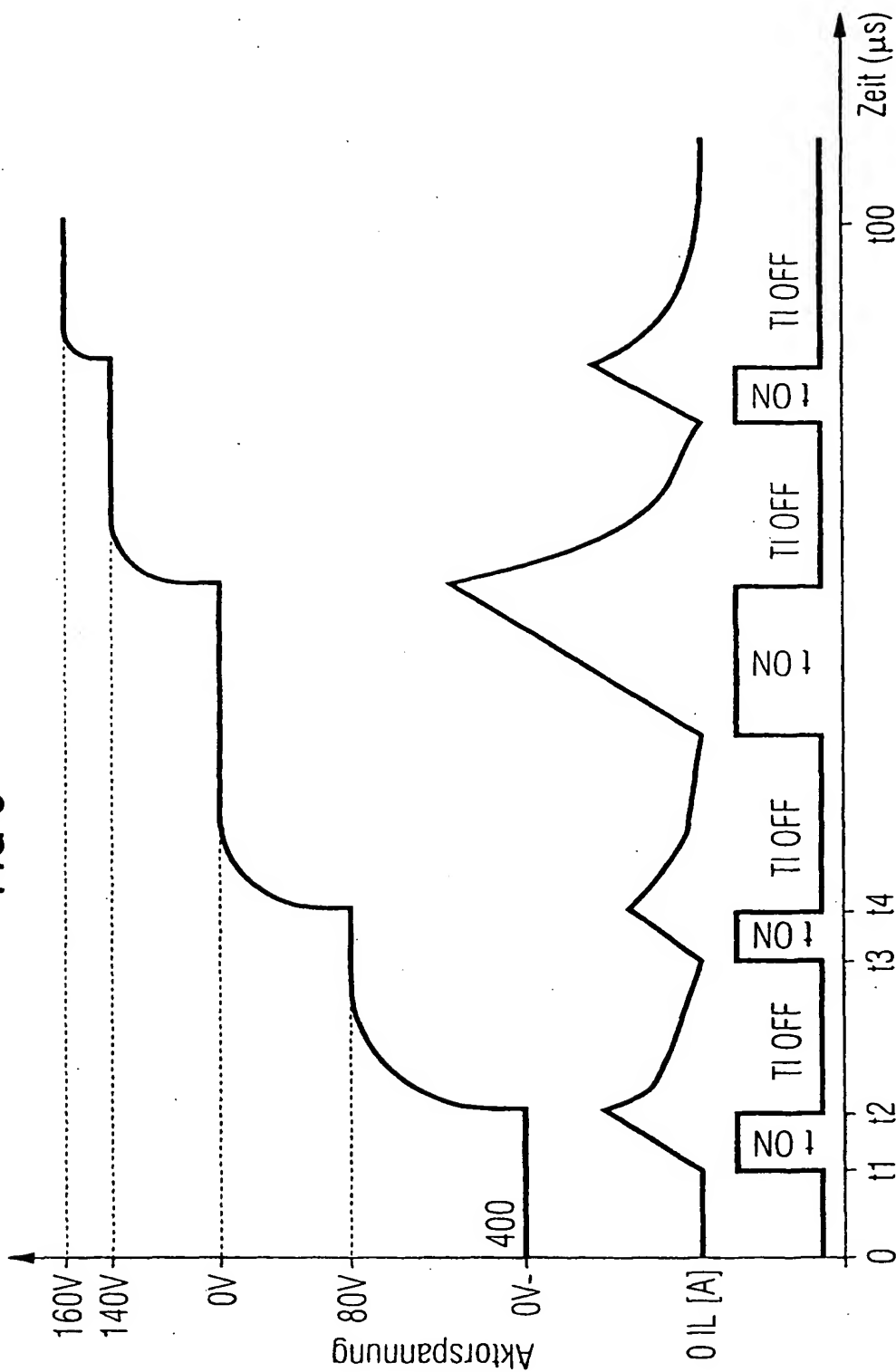
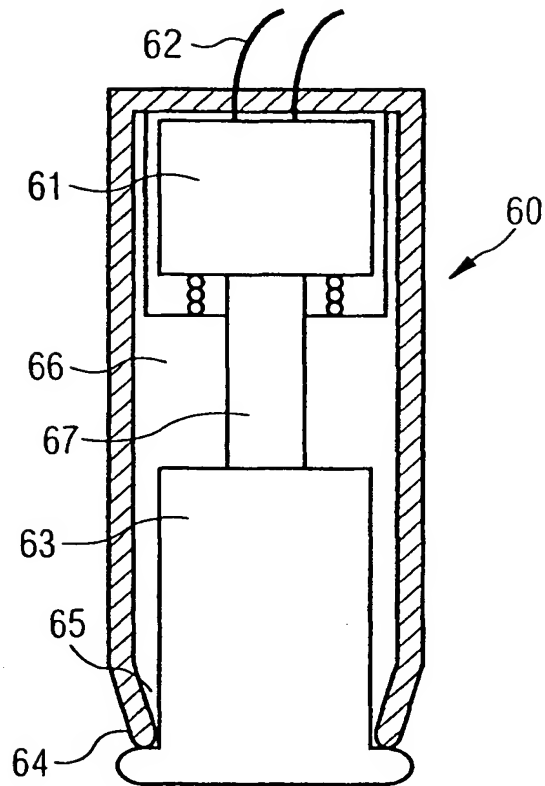
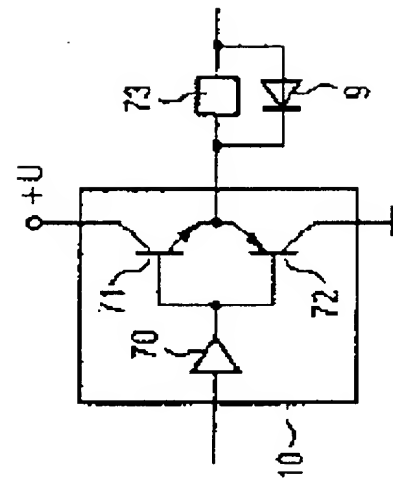
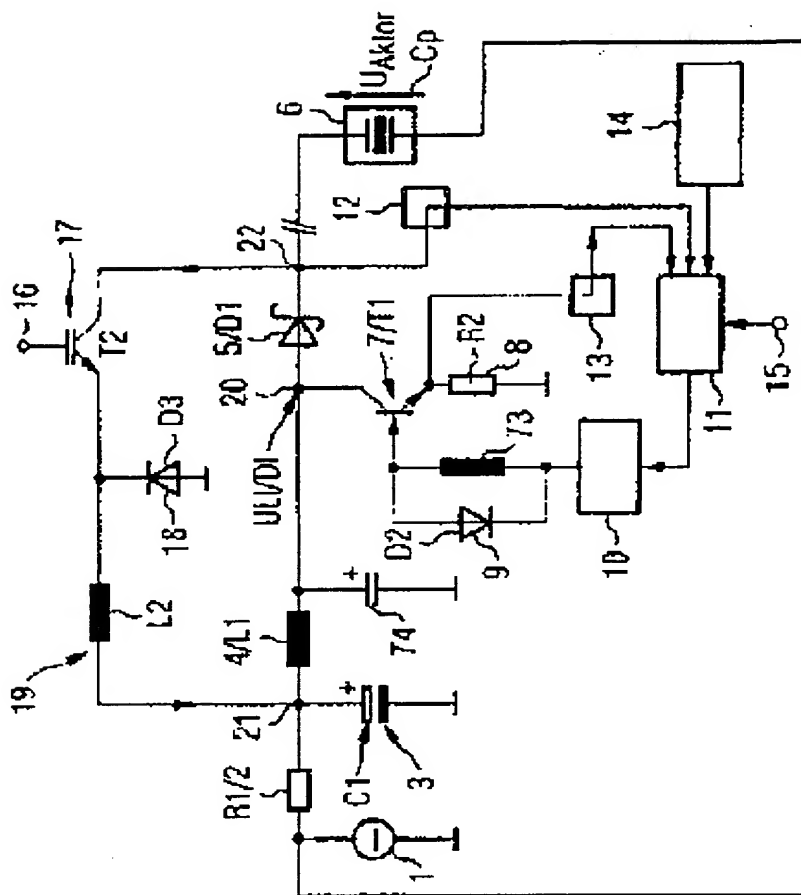


FIG 4



AN: PAT 2001-426479  
TI: Piezoelectric actuator charging method e.g. for actuator  
controlling fuel-injection valve in motor vehicle involves  
charging actuator in two charging steps to specified voltage  
and using a given reference curve during the charging process  
PN: DE19958262-A1  
PD: 05.07.2001  
AB: A method of charging a piezoelectric actuator with one  
voltage source, requires initial measurement of the voltage  
present at the actuator (6), and charging of the actuator (6)  
to a specified voltage is then regulated in relation to the  
measured voltage. The actuator is specifically charged to the  
specified voltage in two charging steps or stages, and a given  
reference curve is used for the actuator charging process. The  
measured voltage is compared with the reference curve and from  
the result of the comparison a voltage increase is determined  
and the charging of the actuator (6) is controlled according to  
the voltage increase.; Allows defined charging of actuator  
independent of changes in electrical properties of actuator.  
PA: (SIEI ) SIEMENS AG;  
IN: CHEMISKY E; KAPPEL A; MALKI L; MEIXNER H;  
FA: DE19958262-A1 05.07.2001;  
CO: DE;  
IC: F02M-051/06; H02N-002/06; H02N-002/14;  
MC: V06-M06D1; V06-N07; V06-U03; X22-A02A;  
DC: Q53; V06; X22;  
FN: 2001426479.gif  
PR: DE1058262 03.12.1999;  
FP: 05.07.2001  
UP: 17.08.2001

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



THIS PAGE BLANK (USPTO)

Docket # S3-03 P 04 867  
Applic. # 10/567, 627  
Applicant: Aspelmayr, etd

Lerner Greenberg Steiner LLP  
Post Office Box 2480  
Hollywood, FL 33022-2480  
Tel: (954) 925-1100 Fax: (954) 925-1101